

基于CFD对公路隧道纵向射流通风系统的研究

胡康^{1,✉}, 邵雪²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 辽宁工业大学, 锦州 121001)

摘要: [目的] 为了分析纵向射流通风系统运行时在隧道中的流场特性。[方法] 应用CFD软件对开启不同数量射流风机的公路隧道纵向射流通风系统进行数值模拟。[结果] 分析其内部流场特性可知: 由于射流风机的喷射作用, 喷射气流贴附于隧道顶部, 并且在射流风机后30 m范围内贴近地面处, 形成了明显的低速流动区域, 另一方面增加射流风机数量可提高隧道内的风速。[结论] 建议射流风机出口设置向下微小倾角或适当降低射流风机安装高度以改善流场。

关键词: 公路隧道; 纵向射流通风系统; CFD

中图分类号: TU921; U453.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)S2-0131-06

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Longitudinal Jet Ventilation System of Highway Tunnel Based on CFD

HU Kang^{1,✉}, SHAO Xue²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: [Introduction] In order to analyze the flow field characteristics of the longitudinal jet ventilation system in the tunnel. [Method] The CFD software was used to simulate the longitudinal jet ventilation system of highway tunnel with different number of jet fans, and the flow field characteristics were analyzed. [Result] It can be seen that, due to the jet action of the jet fan, the jet airflow is attached to the top of the tunnel. And the distinct low-speed flow area is formed near the ground within 30 m after the jet fan. And at the same time, increasing jet fan can increase wind speed in the tunnel. [Conclusion] It is suggested to set a small downward inclination angle at the outlet of the jet fan or to reduce the installation height of the jet fan appropriately in order to improve the flow field.

Key words: highway tunnel; longitudinal jet ventilation system; CFD

纵向射流通风系统, 是利用整个隧道空间作为通风渠道, 借助射流风机提供驱动力, 使新鲜空气从洞口一端吹向另一端, 从而有效降低隧道内烟雾浓度和污染物浓度, 以保证汽车行驶的安全性和司乘人员的舒适性, 具有简化施工和节约运营用电的特点, 所以目前该系统是公路隧道通风方式中最为广泛的通风方式。但是其应用具有一定的局限性, 当隧道比较长时, 有害气体的浓度会沿着顺风方向逐渐增加, 为了稀释有害气体使隧道内空气保持在

允许水平, 需要加大新风的流量, 然而根据工程设计要求隧道内的空气流速一般不小于1.5 m/s, 不超过8 m/s。因此, 纵向射流通风系统仅适应于3 000 m以下的隧道。

对于纵向射流通风系统, 射流风机所提供的风量在满足稀释隧道内CO、烟雾等污染物或火灾时排除烟气的需求的同时, 其所提供的升压力需克服通风阻力, 其计算过程涉及到多种因素, 包括交通量、车型比例、隧道断面尺寸及长度、地貌、气象条件、海拔等。因此, 在实际工程设计过程不仅费时费力, 而且无法直观的了解隧道内部的流场特性, 易受到设计人员经验是否丰富影响。本文选取

收稿日期: 2019-08-27 修回日期: 2019-10-07

基金项目: 辽宁省自然科学基金博士启动“水力空化对离心式低温流体泵水力特性影响研究”(20170520370)

中国南方某双洞单向公路隧道作为研究对象,采用计算流体力学方法^[1-2](Computational Fluid Dynamics, CFD),模拟了开启不同数量射流风机工况,分析其内部流场特性以及风速、压强等分布,对比计算数据,以便指导以后工程设计,提供一定理论依据。

1 公路隧道需风量计算

公路隧道的需风量是指及时稀释或排出有害气体、浮尘烟雾等,满足公路隧道内日常运营以及维修、养护人员洞内作业呼吸要求,创造良好的隧道环境条件,使隧道内空气品质达到所需要的安全卫生标准。根据现行《公路隧道通风设计细则》(JTG/T D70/2-02—2014)的相关规定,在计算需风量时,应分别对稀释烟尘与稀释CO,按隧道设计车速以下,各工况车速10 km/h为一档,分别进行风量计算,并计算交通阻滞时的需风量和换气需风量,取其较大值为设计需风量^[3]。

1.1 稀释CO需风量^[4-7]

1) 隧道内CO的排放量计算公式如下:

$$Q_{CO} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{CO} \cdot f_a \cdot f_d \cdot f_h \cdot f_{iv} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_m) \quad (1)$$

式中: Q_{CO} 为隧道的CO排放量 (m^3/s); q_{CO} 为车辆CO基准排放量 ($m^3/辆 \cdot km$); f_m 为CO的车型系数; f_a 为CO的车况系数; f_{iv} 为CO的纵坡-车速系数; f_h 为CO的海拔高度系数; n 为各车型类别数; N_m 为各车型的实际交通量 (辆/h)。

2) 稀释隧道CO所需的风量计算公式如下:

$$Q_{req(CO)} = \frac{Q_{CO}}{\delta} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0} \times 10^6 \quad (2)$$

式中: $Q_{req(CO)}$ 为隧道的稀释CO的需风量 (m^3/s); P_0 为标准大气压 (kN/m^2),取101.325 kN/m^2 ; P 为隧道所在地大气压 (kN/m^2); δ 为CO设计浓度 (ppm); T_0 为标准气温 (K),取273 K; T 为隧道所在地夏季通风室外计算气温 (K)。

1.2 稀释烟雾需风量^[4-7]

1) 隧道内烟雾排放量计算公式如下:

$$Q_{VI} = \frac{1}{3600} q_{VI} \cdot f_{a(VI)} \cdot f_d \cdot f_{h(VI)} \cdot f_{iv(VI)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^{n_D} (N_m \cdot f_{m(VI)}) \quad (3)$$

式中: Q_{VI} 为隧道全长烟雾排放量 (m^3/s); q_{VI} 为烟

雾基准排放量 ($m^3/辆 \cdot km$); $f_{m(VI)}$ 为(柴油车)车型系数; $f_{a(VI)}$ 为(柴油车)车况系数; $f_{iv(VI)}$ 为(烟雾)纵坡-车速系数; $f_{h(VI)}$ 为(烟雾)海拔高度系数; n_D 为柴油车车型类别数。

2) 稀释隧道烟雾所需的风量计算公式如下:

$$Q_{req(VI)} = \frac{Q_{VI}}{K} \quad (4)$$

式中: $Q_{req(VI)}$ 为隧道全长稀释烟雾的需风量 (m^3/s); K 为烟雾设计浓度 (m^{-1})。

2 公路隧道通风力计算

在公路隧道通风计算时,通常把空气视为不可压缩理想流体,隧道中的空气流动视为不随时间变化的恒定气流,且汽车行驶也可视为恒定的。由此,计算在标准大气压状态下,隧道内空气的 $Re > 5 \times 10^4$,故可将隧道内的空气流动视为完全紊流。

2.1 隧道自然通风力

自然通风力引起的洞内风速根据隧道所在的气象资料、隧道长度、纵坡等因素确定,通常作为阻力考虑,取值2.5 m/s。

$$\Delta p_m = \pm(1 + \varepsilon_c + \lambda_r \cdot \frac{L}{D_r}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_n^2 \quad (5)$$

式中: Δp_m 为隧道自然通风力 (N/m^2); v_n 为自然风作用引起的洞内风速 (m/s); ε_c 为隧道入口局部阻力系数; λ_r 为隧道沿程阻力系数; D_r 为隧道断面当量直径 (m); L 为隧道长度 (m); ρ 为隧道内空气密度。

2.2 隧道交通通风力

本文以双洞单向隧道为研究对象,交通通风力按照单向交通隧道计算。

$$\Delta p_t = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot n_c \cdot (v_t - v_r)^2 \quad (6)$$

$$A_m = (1 - r_1) \cdot A_{cs} \cdot \varepsilon_{c1} + r_1 \cdot A_{cl} \cdot \varepsilon_{c2} \quad (7)$$

式中: Δp_t 为交通通风力 (N/m^2); v_r 为隧道设计风速 (m/s); n_c 为隧道内车辆数; v_t 为各工况车速 (m/s); A_{cs} 为小型车正面投影面积; A_{cl} 为大型车正面投影面积; ε_{c1} 为隧道内小型车或大型车的空气阻力系数。

2.3 隧道通风阻力

$$\Delta p_r = \Delta p_\lambda + \sum \Delta p_{ei} \quad (8)$$

$$\Delta p_{\lambda} = (\lambda_r \cdot \frac{L}{D_r}) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \quad (9)$$

$$\sum \Delta p_{ei} = \varepsilon_i \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_r^2 \quad (10)$$

式中: Δp_r 为隧道内交通阻力 (N/m^2); Δp_{λ} 为隧道内沿程摩擦阻力 (N/m^2); Δp_{ei} 为隧道内局部阻力 (N/m^2); ε_i 为隧道局部阻力系数。

对于纵向射流通风系统, 射流风机的升压力需克服隧道通风阻力和隧道自然通风力, 满足下式:

$$\Delta p_r + \Delta p_m = \Delta p_t + \Delta p_j \quad (11)$$

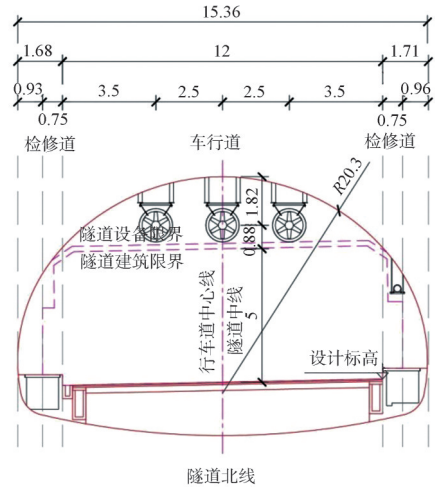
式中: Δp_j —射流风机的总升压力 (N/m^2)。

3 隧道纵向通风系统模拟计算分析

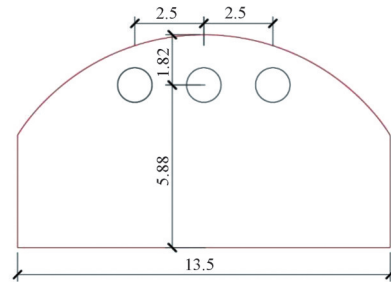
本文研究对象以南方某双洞单向隧道为计算参考模型, 隧道全长为600 m, 宽15.36 m, 净高7.7 m, 隧道通风断面面积94.31 m^2 。隧道采用3台射流风机并排安装方式, 分别在K0+150、K0+275、K0+400里程各设置1组风机, 共计9台射流风机, 做到两用一备, 满足公路隧道各种工况下的使用需求。在模拟计算过程中, 为确保计算的正确性, 采用三维立体全尺寸模型, 考虑到如果按实际情况模拟, 不仅计算量大并且模型网格处理相对复杂, 计算模型按照实际工程尺寸进行相应简化建模, 忽略检修道、排水沟等次要因素, 采用对称面法, 即仅建立隧道右半侧模型, 在后处理中通过镜像得到整个隧道的模拟数据。为了提高计算的精确度, 对射流风机附近区域处的网格进行相应的加密, 划分非结构化网格, 网格数量约260万。如图所示1, 分别表示, 隧道横截面图、简化后隧道模型图以及隧道划分网格后横截面图。

为了方便计算, 进行模型实验时, 在不影响计算结果精度的前提下, 会对隧道内的气体进行适当的假设。在实际工程中, 常常忽略气体的粘滞性, 把气体视为理想气体。因此, 对隧道内的气体通常做以下假设^[8]:

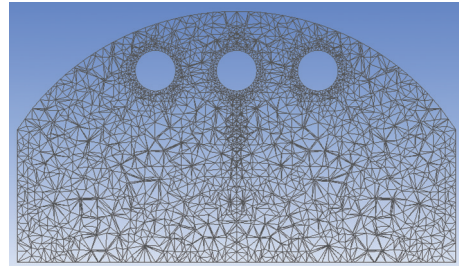
- 1) 隧道内流体是连续介质。
- 2) 隧道内流体具有不可压缩性。
- 3) 隧道内的车流为恒定, 汽车对流场的扰动简化为壁面阻力。
- 4) 隧道内流体温度不变。
- 5) 隧道壁面绝热。
- 6) 隧道内流体是稳定湍流, 且湍流粘性各向



(a) 横截面图



(b) 简化后模型图



(c) 网格图

注:图中尺寸单位为m。

图1 隧道横截面图、简化后模型图以及网格图

Fig. 1 Tunnel cross-section diagram, simplified model diagram, and grid diagram

同性。

- 7) 隧道内流体满足基本的守恒原理。

- 8) 考虑隧道壁面粗糙度对气流的影响为恒定值。

对于隧道内的气流模拟计算, 选用标准 $K-\zeta$ 湍流模型, 标准壁面函数, 开启重力影响, 所有离散项均采用默认设置。设置边界条件时, 壁面均按默

认设置为无滑移壁面边界条件, 隧道地面的壁面粗糙度设置为 0.5 m, 隧道壁面的壁面粗糙度设置为 0.05 m; 隧道的进出口分别设置为压力入口边界条件和压力出口边界条件, 由于缺少隧道所在地相关气象资料, 进行模拟计算时, 暂不考虑进出口风压的影响, 隧道进出口的相对压强均设置为 0 Pa。隧道射流风机入口和出口设置为速度入口边界, 其风速根据设备选型确定, 风速分别设置为 -30 m/s, 30 m/s。求解器采用基于压力的耦合求解, Simplec 算法格式, 以提高收敛性。通过近万次迭代计算, 各物理变量均达到收敛标准, 残差值低于 10^{-4} , 隧道进出口的质量流量误差小于 0.1%, 满足守恒定律, 整个计算达到收敛。按照上述标准, 本文分别对开启一组 (3 台) 射流风机工况, 开启二组 (6 台) 射流风机工况, 开启三组 (9 台) 射流风机工况进行模拟研究, 得到在三种工况下隧道内空气的压力、速度的分布情况, 并分析其流场特性。

如图 2~图 3 所示, 当 3 台射流风机的射流风速离开风机后, 由于卷吸作用, 射流边界与周围空气不断进行动量、质量交换, 周围空气不断被卷入, 射流流量不断增加断面不断扩大, 至距风机出口 60 m 处时, 3 股射流曲线基本融合为一股。而且, 在高速射流离开风机后, 卷吸并没有立刻影响至整个断面, 因此在射流风机下方一定范围内, 风速很小, 产生了类似死区区域, 此处区域的存在对于稀释有害气体、浮尘烟雾以及排除烟气是极为不利, 可以通过调整射流风机出口方向, 使其存在一个微小的向下倾角, 或者适当降低射流风机的安装高度, 以减小死区影响。

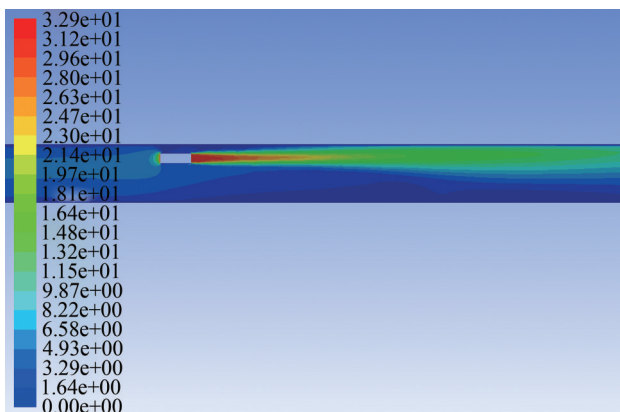


图 2 隧道中心剖面速度分布云图

Fig. 2 The velocity distribution nephogram on the central longitudinal section of tunnel

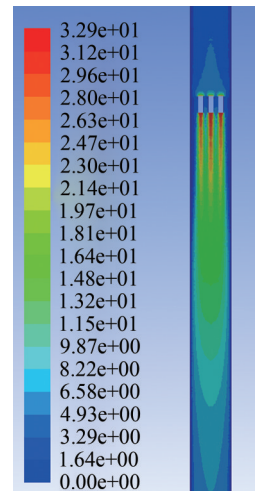


图 3 隧道平面剖面速度分布云图

Fig. 3 The velocity distribution nephogram on the plane section of tunnel section

如图 4~图 9 可知, 当 K0+150 里程处的射流风机开启时, 距离风机出口 0 m、1 m、6 m、26 m、76 m、106 m 的隧道断面上的速度分布云图。可以发现, 当射流气体离开风机后, 射流风速峰值迅速衰减, 至距风机出口 6 m 处, 射流风速峰值衰减至 24 m/s; 由于射流的卷吸作用, 射流边界与周围空气不断进行动量、质量交换, 周围空气不断被卷入, 射流流量不断增加断面不断扩大, 至距风机出口 60 m 处时, 三股射流曲线基本融合为一股; 至距风机出口约 80 m 处时, 射流已扩大整个断面; 至距风机出口约 110 m 处时, 射流效果基本消失, 断面平均风速趋近于 4~5 m/s。射流风机所产生射流约 130 m, 因此当两组射流风机设置间距大于 150 m 时, 前后射流风机相互间的影响可以忽略。

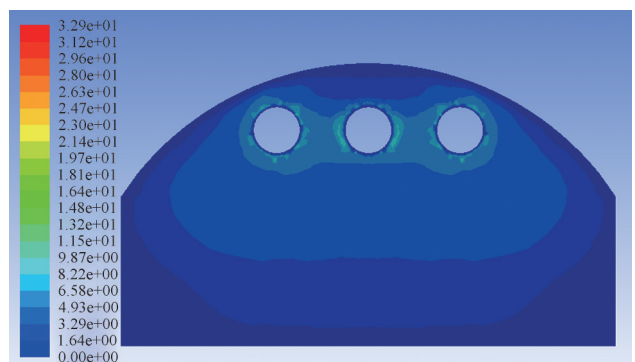


图 4 K0+154 里程截面速度分布云图

Fig. 4 The velocity distribution nephogram on the K0+154 mileage

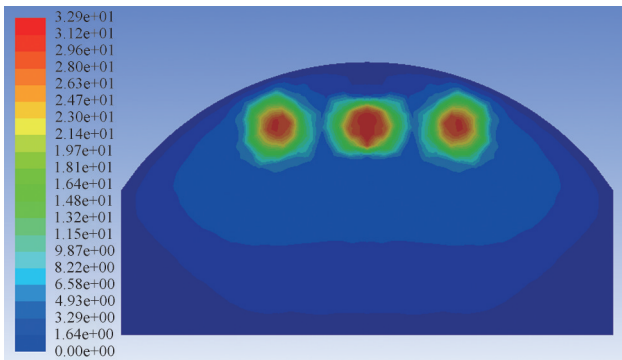


图5 K0+155里程截面速度分布云图

Fig. 5 The velocity distribution nephogram on the K0+155 mile-age section

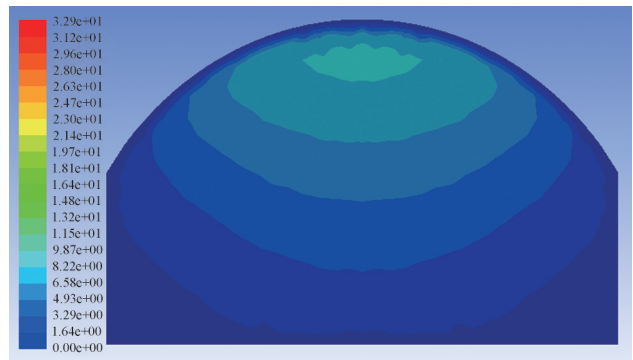


图8 K0+230里程截面速度分布云图

Fig. 8 The velocity distribution nephogram on the K0+230 mile-age section

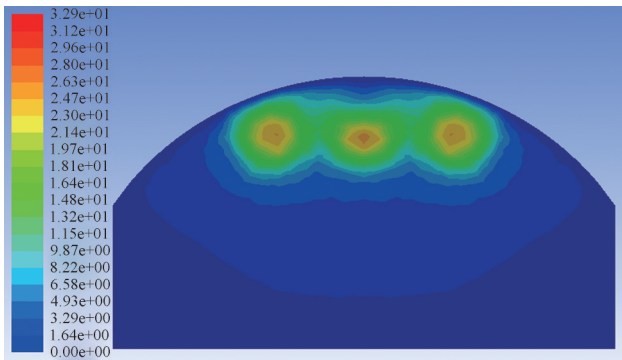


图6 K0+160里程截面速度分布云图

Fig. 6 The velocity distribution nephogram on the K0+160 mile-age section

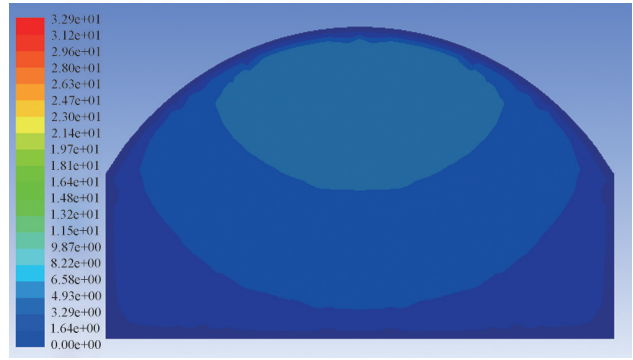


图9 K0+260里程截面速度分布云图

Fig. 9 The velocity distribution nephogram on the K0+260 mile-age section

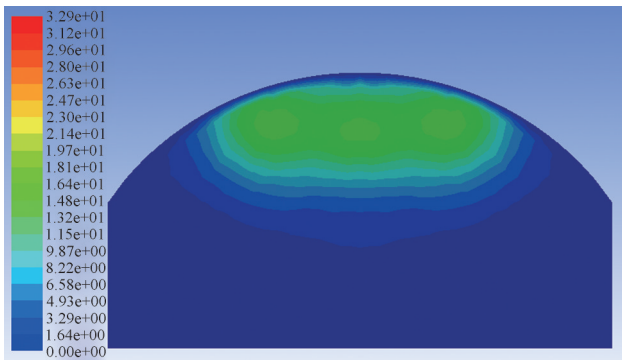


图7 K0+180里程截面速度分布云图

Fig. 7 The velocity distribution nephogram on the K0+180 mile-age section

如图10所示, 根据模拟计算结果可知: 当开启1组(3台)射流风机时, 隧道进出口平均风速为4.005 1 m/s, 3.994 8 m/s, 进出口的平均质量流量为219.531 57 kg/s, -219.530 94 kg/s, (由于未开启第2组射流风机, 射流风机对气流有阻挡作用, 导致风速在此处降低); 当开启2组(6台)射流风

机时, 隧道进出口平均风速为5.474 83 m/s, 5.463 74 m/s, 进出口的平均质量流量为300.051 61 kg/s, -300.050 14 kg/s, 风量较只开启1组射流风机时提升了将近37%左右; 当开启3组(9台)射流风机时, 隧道进出口平均风速为6.459 7 m/s, 6.447 3 m/s, 进出口的平均质量流量为354.057 83 kg/s, -354.058 32 kg/s, 风量较只开启

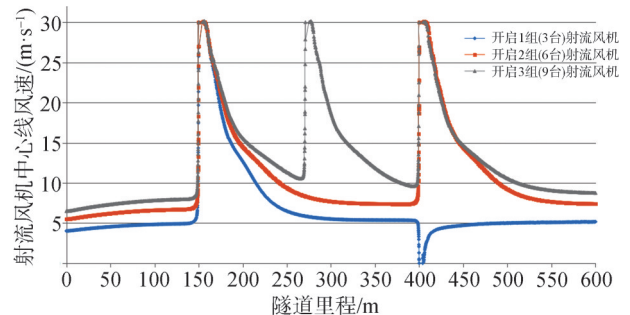


图10 射流风机中心线上速度沿隧道里程的分布曲线

Fig. 10 Distribution curve of velocity on centerline of jet fan along tunnel mileage

2组射流风机时提升了将近18%左右。各工况下的对比数据如表1所示。可知,增加射流风机数量,可以增大隧道内风速,但是随着隧道内风速的增加,射流风机的升压效果对风速的提升作用越来越小。

表1 各工况下隧道出入口的平均风速和平均质量流量

Tab. 1 Average wind speed and average mass flow of tunnel entrances and exits under various working conditions

工况	进出口平均风速 进出口平均质量流量	
	$v/(m \cdot s^{-1})$	$Q/(kg \cdot s^{-1})$
开启1组(3台)射流风机	4.00	219.53
开启2组(6台)射流风机	5.47	300.51
开启3组(9台)射流风机	6.45	354.06

4 结论

从技术上分析,当隧道布置多组射流风机时,为了提高隧道通风效果,前后两组射流风机之间的间距不应小于150 m。射流风机距离隧道出入口距离不超过200 m,不小于100 m,以便在利用射流风机升压效果的同时引入足够的新鲜空气。同时,射流风机的出口方向宜向下偏移,与水平面形成一个微小夹角,以形成稳定的气流,或者适当的减小射流风机的安装,可以减小射流风机后下方的气流低速区域。增加隧道射流风机台数,必然可以提高隧道风速,提高隧道内的空气品质,但是随着风机数量的增多,风速和空气品质的提升效果越来越不明显。从节能角度看,在满足规范要求的前提下,射流风机的不宜过多。

参考文献:

- [1] 王森,刘刚,甘长德. 电缆隧道通风流速对内部高温区影响的研究[J]. 建筑热能通风空调,2018,37(11):51-54.
WANG M, LIU G, GAN C D. Influence of ventilation velocity in cable tunnel on high temperature zone in tunnel [J]. Building Energy & Environment, 2018, 37(11): 51-54.
- [2] 孙文龙. 核电厂汽轮机房通风系统精细化设计方法[J]. 南方能源建设,2016,3(3):57-62.
SUN W L. Fine design for turbine room ventilation system of NPP [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(3): 57-62.
- [3] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路通风隧道设计细则: JTG/T D70/2-02—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2014: 29-33.
China Merchants Transportation Research and Design Institute

Co., Ltd. Guidelines for design of ventilation of high tunnels: JTG/T D70/2-02—2014 [S]. Beijing: China Communications Publishing Co., Ltd., 2014: 29-33.

- [4] 潘洁. 城市隧道射流通风的模型实验及数值模拟[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
PAN J. Model experiment and numerical simulation of jet ventilation in urban tunnels [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [5] 叶青. 长大公路隧道纵向通风系统数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
YE Q. Numerical simulation of large-long road tunnels using longitudinal ventilation system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [6] 曹正卯. 长大隧道与复杂地下工程施工通风特性及关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
CAO Z M. Study on ventilation characteristics and key technologies of long tunnels and complicated underground engineering in the construction stage [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [7] 孙玉环. 秦岭终南山隧道自然风通风利用计算与仿真[D]. 西安: 长安大学, 2014.
SUN Y H. Calculation and simulation of natural ventilation in qinling zhongnanshan tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [8] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG S M, TAO W Q. Heat transfer (the fourth edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

作者简介:



胡康

胡康(通信作者)

1989-, 男, 湖南益阳人, 工程师, 注册公用设备工程师(暖通专业), 华中科技大学制冷及低温工程专业硕士, 主要从事数据中心制冷研究及设计(e-mail) hukang@gedi.com.cn。

邵雪

1984-, 女, 山东沂水人, 辽宁工业大学土木建筑工程学院讲师, 中国科学院大学制冷及低温工程专业博士研究生, 主要研究领域为低温、传热、旋转机械(e-mail) shaouxue2006@aliyun.com。

(责任编辑 李辉)